

法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

SS-OCTシステムにおける干渉波の雑音解析に関する研究

著者	須永 寛
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	60
ページ	1-4
発行年	2019-03-31
URL	http://doi.org/10.15002/00022049

SS-OCT システムにおける 干渉波の雑音解析に関する研究

NOISE ANALYSIS ON INTERFERENCE WAVEFORM IN SS-OCT SYSTEM

須永寛

Hiroshi SUNAGA

指導教員 品川満

法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士課程

This paper describes noise analysis of an interference waveform in a swept source optical coherence tomography system using $\text{K}a\text{T}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ deflector. The quality of a tomographic image depends on depth deviation and signal-to-noise ratio(SNR) of a point spread function. The voltage noise and jitter dependence on depth deviation and SNR were simulated using developed simulator. We found that the depth deviation and SNR limited by jitter in our system.

Key Words : Optical coherence tomography, voltage noise, jitter, simulation

1. 序論

近年、高齢化に伴い視覚障害を患う患者が増加している。失明の主な原因である緑内障の患者数は世界中で増加傾向にあり、2040 年までに約 2 倍になると予想されている[1]。緑内障の早期発見には視神経の形状や厚みから診断する眼底検査が有用であり、近年では眼底の 3 次元画像を空間分解能数 μm オーダーで得る装置として光干渉断層計(OCT: Optical Coherence Tomography)システムが用いられている。OCT システムの中でも特に高精度な断層画像を高速で取得できる波長掃引光源を用いた Swept Source OCT(SS-OCT)システムが着目されている。

波長掃引光源の 1 種にタンタル酸ニオブ酸カリウム(KTN: $\text{K}a\text{T}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$)結晶を用いた光偏向器を内蔵した KTN 波長掃引光源がある[2]。KTN 波長掃引光源では KTN 結晶の持つ電気光学効果を利用し、電氣的に光を偏向し波長掃引を行うため、掃引周波数が 200 kHz と高速であり、従来の SS-OCT システムよりも短時間での断層画像の取得が可能である。得られる断層画像の精度は 1 画素を表す Point Spread Function(PSF)のピークパワーをとる深さのばらつきと信号対雑音比(SNR)に左右される。KTN 波長掃引光源を用いた SS-OCT システムでは電気光学を用いたことで、電圧雑音とジッターによる深さばらつきと SNR への影響が懸念されている。本研究では、電圧雑音とジッターによる深さばらつきと SNR への影響についてシミュレーションすることで、性能を制限している支配的要因を明らかにすることを目的とした。

2. KTN 波長掃引光源を用いた SS-OCT システム

図 1 に KTN 波長掃引光源を用いた SS-OCT システムの構成図を示す。

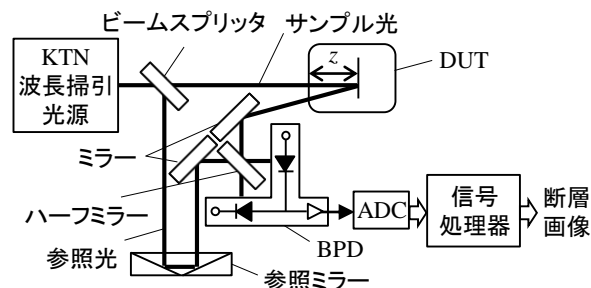


図 1 KTN 波長掃引光源を用いた SS-OCT システム

KTN 波長掃引光源から出射された光はビームスプリッタにて参照光とサンプル光の 2 つに分岐され、それぞれ参照ミラー、測定対象物(DUT)内の反射面にて反射され、ミラーへ向かう。参照光とサンプル光はハーフミラーを通過し干渉することで光路長差に応じたビート周波数を持つ干渉波を 2 波形成る。2 つの干渉波は Balanced photo detector(BPD)の Photo Detector(PD)にて光信号から電気信号へ変換され、差動アンプを用いて差動検出される。電気信号に変換された干渉波はアナログ - デジタル変換器(ADC)にてアナログ信号からデジタル信号に変換される。その信号にリスケーリングやフーリエ変換などの信号処理を行うことでスペクトルを算出し、PSF を得る。

干渉波の電圧 $V(t)$ は次式で与えられる。

$$\frac{V(t)}{V_0} = \cos(2zk(t)) \quad (1)$$

ここで、 V_0 は雑音なし干渉波の片側振幅、 z は DUT 表面から DUT 内での反射面までの距離、 $k(t)$ は 次式で与えられる KTN 波長掃引光源からの出力光の波数の時間変化を表す関数である[3].

$$k(t) = \frac{2\pi}{\lambda_0 + \frac{1}{mN} (\sin(\alpha + \psi_0 \sin(2\pi f_{\text{DRV}} t)) - \sin(\alpha))} \quad (2)$$

$$\psi_0 = \sin^{-1}\left(\frac{mN\Delta\lambda}{2\cos(\alpha)}\right) \quad (3)$$

ここで、 $\lambda_0(=1.06 \mu\text{m})$ は中心波長、 $m(=1)$ は回折格子次数、 $N(=600 \text{ line/mm})$ は回折格子溝間隔、 $\alpha(=60^\circ)$ は回折格子の角度、 $f_{\text{DRV}}(=200 \text{ kHz})$ は KTN ドライバーからの印加電圧の周波数、 $\Delta\lambda(=100 \text{ nm})$ は波長掃引幅である．図 2 に(1)式を元に生成した雑音なし干渉波を示す．ここでは z を網膜の厚さを想定し 0.5 m とした．

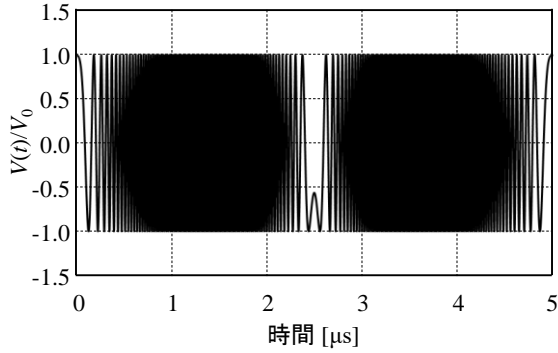


図2 雑音なし干渉波

3. 雑音のモデル化と評価方法

電圧波形に含まれる雑音は図3に示すように電圧軸方向に揺らぐ電圧雑音と時間軸方向に揺らぐジッターに分類することが出来る．電圧雑音による電圧誤差は波形全体に存在する．一方で、ジッターによる電圧誤差は電圧波形の急峻な傾きの箇所のみ存在する．

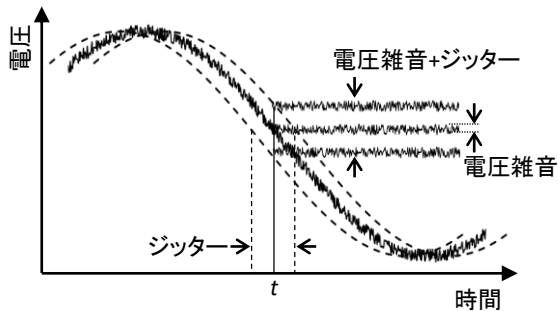


図3 電圧波形に含まれる電圧雑音とジッター

KTN 波長掃引光源を用いた SS-OCT システムにおける雑音の発生源について図4に示す．

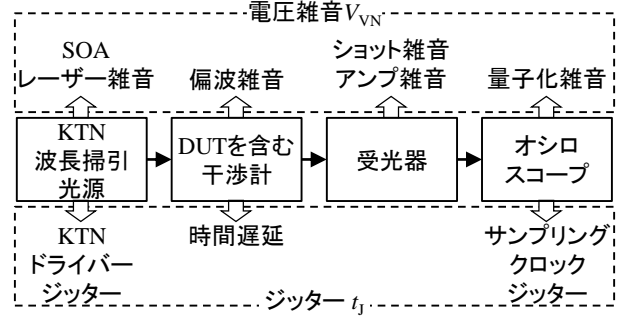


図4 SS-OCT システムにおける雑音の発生源

KTN 波長掃引光源、干渉計、受光器、オシロスコープの4つが雑音の発生源として考えられる．電圧雑音となるものとして、自然放出光や戻り光に起因する SOA レーザー雑音、ファイバーの揺らぎにより偏光が揺らぐことに起因する偏波雑音、PD へ流れる光電流の量子的な揺らぎに起因するショット雑音、アンプ内部の素子における熱雑音に起因するアンプ雑音、ADC の量子化誤差に起因する量子化雑音がある．これらをまとめて電圧雑音 V_{VN} とする．ジッターとなるものとして KTN 結晶への印加電圧における電圧揺らぎと時間揺らぎに起因する KTN ドライバージッター、測定中の DUT のずれに起因する時間遅延、サンプリングクロックの時間的揺らぎに起因するサンプリングクロックジッターがある．これらをまとめてジッター t_j とする．電圧雑音とジッターを含む干渉波生成式は次式で与えられる．

$$\frac{V(t)}{V_0} = \frac{V_{\text{VN}}}{V_0} + \cos(2zk(t + t_j)) \quad (4)$$

電圧雑音 V_{VN} とジッター t_j は次式で与えられる．

$$V_{\text{VN}} = \Delta V Q \quad (5)$$

$$t_j = \Delta t Q' \quad (6)$$

ここで、 ΔV は電圧雑音の標準偏差、 Δt はジッターの標準偏差である． Q と Q' はボックスミュラー法を用いて生成したガウス分布に従う乱数である．実測の結果から、電圧雑音の典型値 $\Delta V_{\text{TYP}}/\Delta V$ を 0.013、ジッターの典型値 Δt_{TYP} を 1 ns とした[4].

電圧雑音とジッターを付加した干渉波をフーリエ変換し、スペクトルを求め、横軸を周波数軸から深さ軸に変換することで PSF を求める．PSF の評価指標は DUT 表面から DUT 内の反射面までの距離 z を表すピークパワーの深さばらつきと反射面での反射量を示す SNR とした．深さばらつきの評価方法を図5に示す．

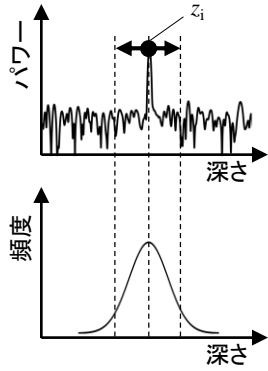


図5 深さばらつきの評価方法

PSF のピークパワーをとる深さ z_i を求め、その深さばらつき Δz を算出した。 Δz は次式で求められる。

$$\Delta z = \frac{1}{z_{AVE}} \sqrt{\sum_{i=1}^M (z_i - z_{AVE})^2 / (M-1)} \quad (7)$$

ここで、 i は波形番号、 $M(=50)$ はシミュレーションした試行回数、 z_i は i 波形目の PSF におけるピークパワーをとる深さ、 z_{AVE} は M 波形の深さの平均である。 SNR の評価方法を図 6 に示す。

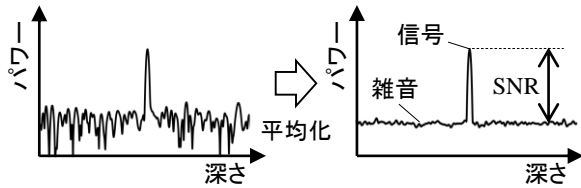


図6 SNR の評価方法

SNR の評価は、 $M(=50)$ 波形の PSF を平均化した PSF_{AVE} において行った。 PSF_{AVE} における SNR は次式で求められる。

$$SNR [dB] = 10 \times \log_{10} \left(\frac{PSF_{AVE,S}}{PSF_{AVE,N}} \right) \quad (8)$$

ここで、 $PSF_{AVE,S}$ 、 $PSF_{AVE,N}$ はそれぞれ信号パワーとノイズパワーを表す。 SNR は電圧雑音とジッターの典型値 $\Delta V_{TYP}/V_0$ 、 Δt_{TYP} を付加した際の SNR(=SNR_{TYP})を用いて規格化し、評価する。

4. シミュレーション結果

電圧雑音 $\Delta V/V_0$ を干渉波に付加した際の深さばらつき Δz への影響を図 7 に示す。 深さばらつき Δz は電圧雑音 $\Delta V/V_0=0.05$ から急激に増加することが分かった。 電圧雑音の典型値 $\Delta V_{TYP}/V_0$ は 0.013 であるため、深さばらつき Δz には影響を及ぼさないと考えられる。

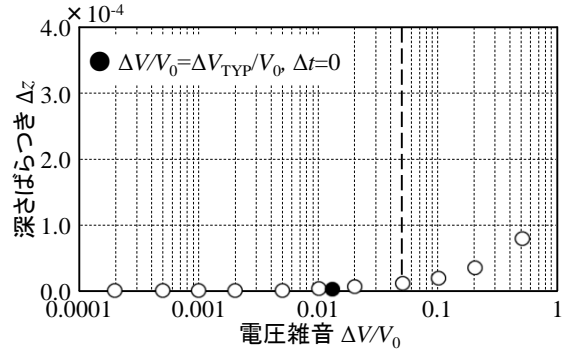


図7 深さばらつきの電圧雑音依存性

電圧雑音 $\Delta V/V_0$ を干渉波に付加した際の SNR への影響を図 8 に示す。 破線は 20 dB/decade を表す。 電圧雑音に依存して SNR は 20 dB/decade で悪化することが分かった。

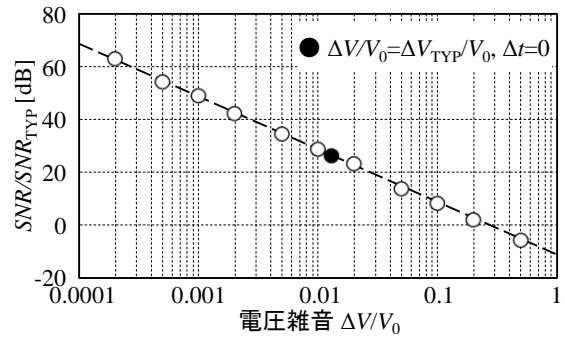


図8 SNR の電圧雑音依存性

ジッター Δt を干渉波に付加した際の深さばらつき Δz への影響を図 9 に示す。 深さばらつき Δz はジッター $\Delta t=0.2$ ns から急激に増加することが分かった。 ジッターの典型値 Δt は 1 ns であるため深さばらつきに影響を及ぼすと考えられる。

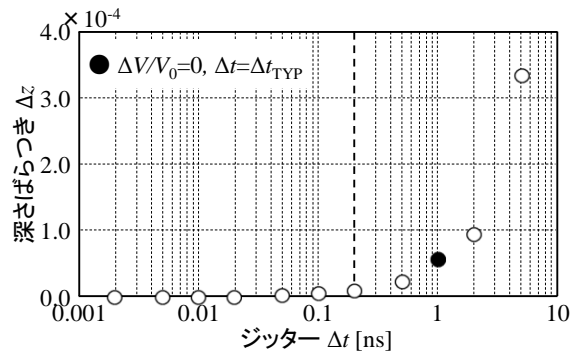


図9 深さばらつきのジッター依存性

ジッター Δt を干渉波に付加した際の SNR への影響を図 10 に示す。 破線は 20 dB/decade を表す。 ジッターに依存して SNR は 20 dB/decade で悪化することが分かった。 ジッターが 5 ns 以上の範囲においては、ジッターによるリスケーリング誤差の影響で 20 dB/decade から外れている

と考えられる。

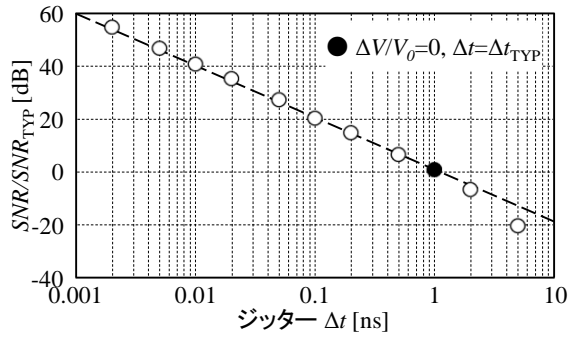


図 10 SNR のジッター依存性

電圧雑音 $\Delta V/V_0$ とジッター Δt を干渉波に同時に付加した際の深さばらつき Δz への影響を図 11 に示す。□ ($\Delta V/V_0=0.001$), ○ ($\Delta V/V_0=0.005$), ◇ ($\Delta V/V_0=0.01$) は各ジッター Δt において互いに近い値をとることが分かった。よって、電圧雑音が $\Delta V/V_0=0.01$ 以下のとき深さばらつき Δz は電圧雑音ではなくジッターに依存すると考えられる。

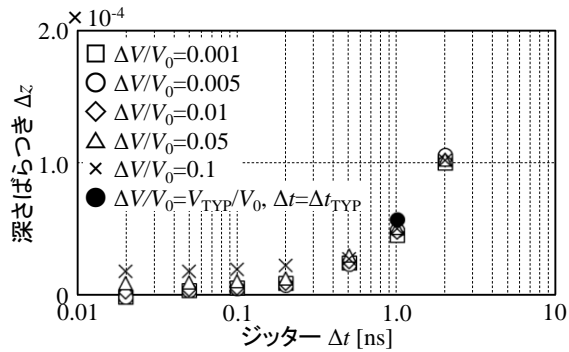


図 11 深さばらつきの電圧雑音とジッター依存性

電圧雑音 $\Delta V/V_0$ とジッター Δt を干渉波に同時に付加した際の SNR への影響を図 12 に示す。破線は 20 dB/decade を表す。□ ($\Delta V/V_0=0.001$), ○ ($\Delta V/V_0=0.005$) は各ジッター Δt において互いに近い値をとることが分かった。このことから、電圧雑音 $\Delta V/V_0$ が $\Delta V/V_0=0.05$ 以下のとき、SNR は電圧雑音ではなくジッターに依存すると考えられる。

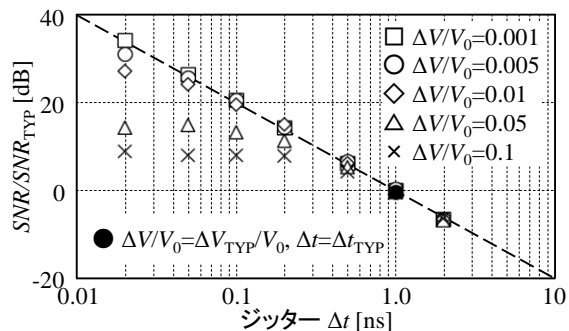


図 12 SNR の電圧雑音とジッター依存性

電圧雑音とジッターの典型値である $\Delta V_{\text{Typ}}/\Delta V$, Δt_{Typ} における深さばらつき Δz と SNR を表 1 にまとめる。

表 1 電圧雑音とジッターの典型値における Δz と SNR

	$\Delta V/V_0=\Delta V_{\text{Typ}}/V_0$	$\Delta V/V_0=0$	$\Delta V/V_0=\Delta V_{\text{Typ}}/V_0$
	$\Delta t=0$	$\Delta t=\Delta t_{\text{Typ}}$	$\Delta t=\Delta t_{\text{Typ}}$
Δz	1.8×10^{-6}	5.7×10^{-5}	5.8×10^{-5}
$\text{SNR}/\text{SNR}_{\text{Typ}}$	26.5 dB	1.1 dB	0 dB

ジッター Δt_{Typ} を干渉波に付加した際の深さばらつき Δz と SNR は電圧雑音 $\Delta V_{\text{Typ}}/V_0$ とジッター Δt_{Typ} を同時に干渉波に付加した際の深さばらつき Δz と SNR にそれぞれ近い値をとることが分かった。よって、KTN 波長掃引光源を用いた SS-OCT システムにおいて、深さばらつき Δz と SNR はジッターにより制限されていると考えられる。ジッターの発生源として、KTN 波長掃引光源、DUT、オシロスコープがある。1 ns のジッターを実測で測定した際、DUT にはミラーを置いていたため DUT のずれによる時間遅延は無視できる。オシロスコープにおけるサンプリングクロックジッターは ps オーダーである。よって、KTN 波長掃引光源内の KTN ドライバージッターにより性能は制限されているのではないかと考えられる。

5. 結論

本研究では、電圧雑音とジッターを含む干渉波生成シミュレータの開発を行い、KTN 波長掃引光源を用いた SS-OCT システムにおいて断層画像の精度を左右する Point Spread Function の深さばらつきと信号対雑音比は電圧雑音よりもジッターに制限されていることを明らかにした。今後は実測においてジッターを変化させ、シミュレーション結果と比較を行い、整合性を確認する必要がある。整合性を確認できれば、シミュレーションから性能を制限している支配的要因を特定することが可能となり、性能向上の糸口になると考えられる。

参考文献

- 1) Tham, Y. C. et al. : Global Prevalence of Glaucoma and Projections of Glaucoma Burden through 2040, *Ophthalmology*, vol. 121, no. 11, pp. 2081-2090, 2014.
- 2) Okabe, Y. et al. : High-speed optical coherence tomography system using a 200-kHz swept light source with a KTN deflector, *Opt. Photo. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 190-193, 2013.
- 3) Akiyama, T. et al. : Wide angle $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ deflector for swept light source using DC charge technique, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 95, pp. 09SD02-1-09SD02-6, 2016.
- 4) Endo, K. et al. : Noise evaluation of optical coherence tomography with $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ swept wavelength light source, *Proc. Int. Conf. Technol. Soc. Sci.* 2017, I08_1, 2017.